

УДК 62.83.52:62.503.56

**ВОСЕМНАДЦАТИЭТАПНАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ  
ДИАГРАММА ДЛЯ СРЕДНИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА  
ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С УПРУГИМ  
ВАЛОПРОВОДОМ**

**EIGHTEEN-STAGE TIME-OPTIMAL CHART FOR MEDIUM MOVEMENTS OF THE  
EXECUTIVE BODY OF THE PRECISION DIRECT CURRENT ELECTRIC DRIVE  
WITH ELASTIC SHAFTING**

**Добробаба Юрий Петрович**

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Кубанский государственный  
технологический университет

**Кошкин Гордей Анатольевич**

кандидат технических наук,  
начальник цеха,  
НКУ ООО «Прогресс»

**Чуб Наталья Викторовна**

студентка,  
Кубанский государственный  
технологический университет  
natali.chub.95@mail.ru

**Аннотация.** Предлагается вместо известной оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом, состоящей из двадцати шести этапов, использовать 18-этапную оптимальную по быстродействию диаграмму для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом. Такое решение позволит уменьшить затраты при внедрении прецизионных электроприводов постоянного тока с упругим валопроводом, обрабатывающих средние перемещения исполнительного органа механизма.

Разработан алгоритм, позволяющий определить параметры 18-этапной оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом.

Для 18-этапной оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом определена область существования.

**Ключевые слова:** упругий валопровод, 18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма, средние перемещения, прецизионный электропривод постоянного тока.

**Dobrobaba Yury Petrovich**

Candidate of technical sciences,  
Associate professor,  
Professor of department  
of power supply industrial enterprises,  
Kuban state technological university

**Koshkin Gordey Anatolyevich**

Candidate of technical sciences,  
Foreman,  
NKU LLC Progress

**Chub Natalya Viktorovna**

Student,  
Kuban state technological university  
natali.chub.95@mail.ru

**Annotation.** Offers instead is known time-optimal chart for medium movements of the executive body of the precision direct current electric drive with elastic shafting, consisting of twenty-six stages, use of 18-stage time-optimal chart for medium movements of the executive body of the precision direct current electric drive with elastic shafting. This solution will allow to reduce costs in the implementation of precision direct current electric drives with elastic shafting, executed the medium movements of the executive body of the mechanism.

Developed algorithm to determine the parameters of the 18-stage time-optimal chart for medium movements of the executive body of the precision direct current electric drive with elastic shafting.

For the 18-stage time-optimal chart for medium movements of the executive body of the precision direct current electric drive with elastic shafting is determined the region of existence of.

**Keywords:** elastic shafting, 18-stage time-optimal chart, medium movements, the precision direct current electric drive.

Для многих промышленных механизмов, упруго соединенных с электродвигателем, не требуется ограничение на второй производной угловой скорости механизма.

Для таких механизмов предлагается группа малоэтапных оптимальных по быстродействию диаграмм для перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом:

- для малых перемещений с ограничением пятой производной угловой скорости механизма, состоящая из четырнадцати этапов;
- для средних перемещений с ограничениями первой и пятой производных угловой скорости механизма, состоящая из восемнадцати этапов;
- для больших перемещений с ограничениями угловой скорости механизма и её первой и пятой производных, состоящая из девятнадцати этапов.

Такое решение позволяет сократить количество этапов в каждой диаграмме, что упростит внедрение прецизионных электроприводов постоянного тока с упругим валопроводом в промышленность.

В статье [1] разработана 14-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом.

В данной работе разрабатывается 18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом.

На рисунке 1 представлена 18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом.

На первом, третьем, седьмом, девятом, одиннадцатом, тринадцатом, пятнадцатом, и семнадцатом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(5)}$  равна максимальному значению  $\omega_{max}^{(5)}$ ; на втором, четвертом, шестом, восьмом, десятом, двенадцатом, шестнадцатом и восемнадцатом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(5)}$  равна максимальному значению со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(5)}$ . На пятом и четырнадцатом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(5)}$  равна нулю. Длительность первого, четвертого, шестого, девятого, десятого, восьмого и четырнадцатого этапов равна  $t_1$ ; длительность второго, третьего, седьмого, восьмого, одиннадцатого, двенадцатого, шестнадцатого и семнадцатого этапов равна  $(t_1 + t_2)$ ; длительность пятого и четырнадцатого этапов равна  $t_3$ . В моменты времени  $t_1$ ,  $(3t_1 + 2t_2)$ ,  $(13t_1 + 6t_2 + 2t_3)$  и  $(15t_1 + 8t_2 + 2t_3)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(4)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(4)}$ ; в моменты времени  $(5t_1 + 2t_2 + t_3)$ ,  $(7t_1 + 4t_2 + t_3)$ ,  $(9t_1 + 4t_2 + t_3)$  и  $(11t_1 + 6t_2 + t_3)$  четвертая производная угловой скорости механизма  $\omega_2^{(4)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(4)}$ ; в моменты времени  $(6t_1 + 3t_2 + t_3)$  и  $(10t_1 + 5t_2 + t_3)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(4)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(4)*}$ ; в моменты времени  $(2t_1 + t_2)$  и  $(14t_1 + 7t_2 + 2t_3)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(4)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(4)*}$ . На третьем и четырнадцатом этапах четвертая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(4)}$  равна нулю. В моменты времени  $2t_1$ ,  $(6t_1 + 4t_2 + t_3)$ ,  $(10t_1 + 6t_2 + t_3)$  и  $(14t_1 + 6t_2 + 2t_3)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(3)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(3)}$ ; в моменты времени  $(2t_1 + 2t_2)$ ,  $(6t_1 + 2t_2 + t_3)$ ,  $(10t_1 + 4t_2 + t_3)$  и  $(14t_1 + 8t_2 + 2t_3)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(3)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(3)}$ . На третьем и четырнадцатом этапах третья производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(3)}$  равна нулю. В моменты времени  $(2t_1 + t_2)$  и  $(14t_1 + 7t_2 + 2t_3)$  вторая про-

изводная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(2)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(2)}$  в моменты времени  $(6t_1 + 3t_2 + t_3)$  и  $(10t_1 + 5t_2 + t_3)$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(2)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(2)}$ . На третьем и четырнадцатом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(2)}$  равна нулю. В момент времени  $(4t_1 + 2t_2)$  первая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(1)}$  достигает максимально допустимого значения  $\omega_{доп}^{(1)}$ ; в момент времени  $(12t_1 + 6t_2 + t_3)$  первая производная угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_2^{(1)}$  достигает максимально допустимого значения со знаком «минус»  $-\omega_2^{(1)}$ . В момент времени  $(8t_1 + 4t_2 + t_3)$  угловая скорость исполнительного органа механизма  $\omega_2$  равна максимальному значению  $\omega_{max}$ . За время цикла  $T_\omega = 16t_1 + 8t_2 + 2t_3$  угол поворота исполнительного органа механизма изменяется от начального значения угла поворота  $\varphi_{нач}$  до конечного значения угла поворота  $\varphi_{кон}$ .

Для 18-этапной оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом справедливы следующие соотношения:

$$t_1 = (\sqrt{2} - 1) \cdot 4 \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}; \quad (1)$$

$$t_2 = (2 - \sqrt{2}) \cdot 4 \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}; \quad (2)$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}} - 3\sqrt{2} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}; \quad (3)$$

$$T_\omega = 2 \cdot \sqrt{\frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}} - 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}; \quad (4)$$

$$\omega_{max}^{(4)} = (\sqrt{2} - 1) \cdot 4 \sqrt{6 \cdot \omega_{доп}^{(1)} \cdot [\omega_{max}^{(5)}]^3}; \quad (5)$$

$$\omega_{max}^{(3)} = (3 - 2\sqrt{2}) \cdot \sqrt{6 \cdot \omega_{доп}^{(1)} \cdot \omega_{max}^{(5)}}; \quad (6)$$

$$\omega_{max}^{(2)} = (\sqrt{2} - 1) \cdot 4 \sqrt{\frac{8}{3} \cdot [\omega_{доп}^{(1)}]^3 \cdot \omega_{max}^{(5)}}; \quad (7)$$

$$\omega_{max} = \omega_{доп}^{(1)} \cdot \left[ \sqrt{\frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}} - \sqrt{2} \cdot 4 \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} \right]; \quad (8)$$

$$\omega_{доп}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{J}, \quad (9)$$

где  $I_{доп}$  – максимально допустимое значение тока якорной цепи, А;  $M_{со}$  – момент сопротивления электропривода,  $C_M$  – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, В·с;  $J$  – момент инерции электропривода, кг·м<sup>2</sup>.

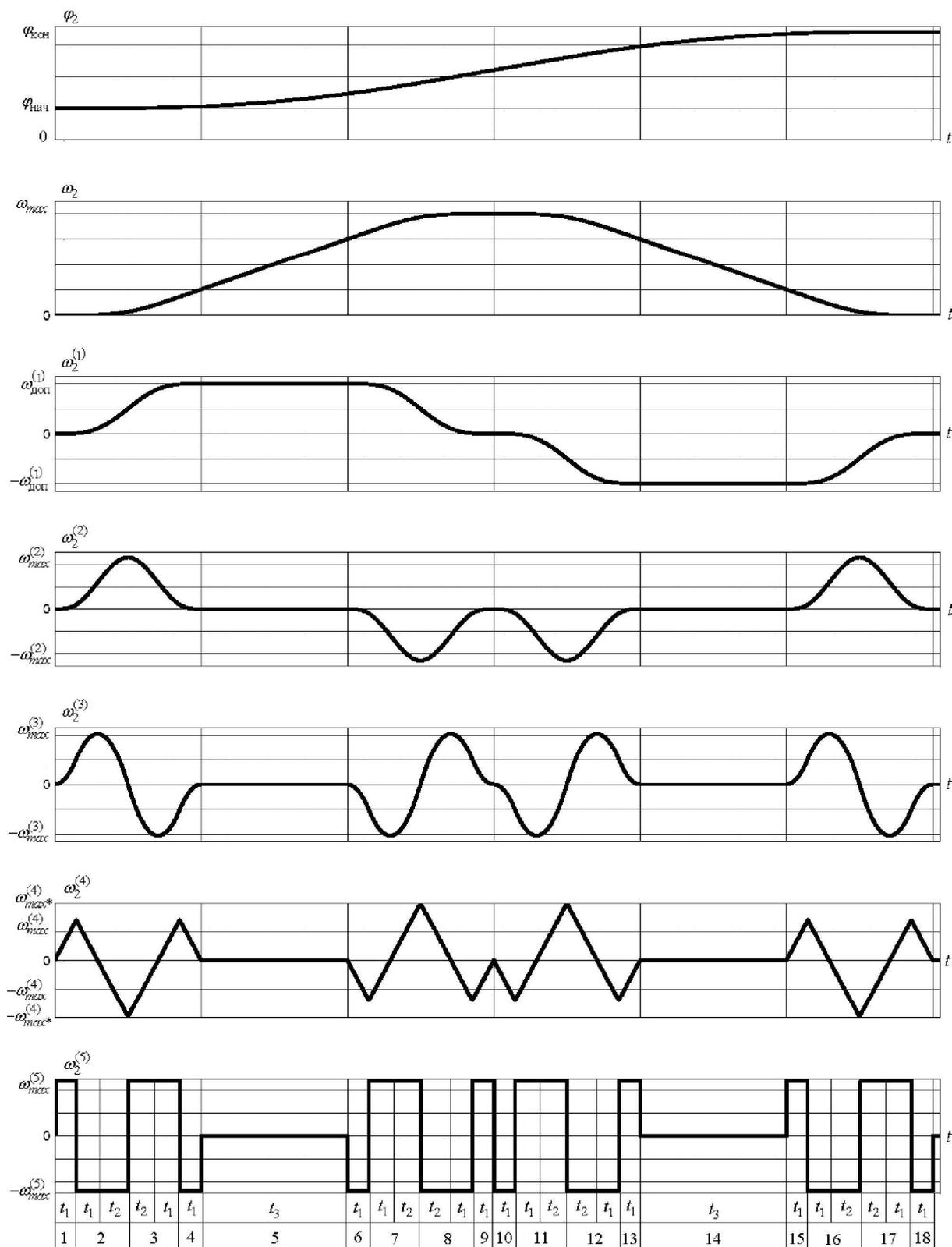


Рисунок 1 – 18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом

18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом справедлива при выполнении условия

$$\Phi_{гр.1} \leq (\Phi_{кон} - \Phi_{нач}) \leq \Phi_{гр.2}, \quad (10)$$

где  $\varphi_{зр.1} = 16 \cdot \omega_{доп}^{(1)} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}$ ;  $\varphi_{зр.2} = \omega_{доп} \cdot \left[ \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(1)}} \cdot 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} \right]$ .

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующее значение максимально допустимой величины тока якорной цепи  $I_{доп} = 8A$  и следующее значение максимально допустимой величины угловой скорости исполнительного органа механизма  $\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}$ .

Параметры силовой части электропривода:  $C_M = 1,25B \cdot с$  и  $J = 0,05 кг \cdot м^2$ .

Момент сопротивления электропривода  $M_{со} = 5H \cdot м$ .

При этом максимально допустимое значение первой производной угловой скорости исполнительного органа механизма равно  $\omega_{доп}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2}$ .

Если максимальное значение пятой производной угловой скорости  $\omega_{max}^{(5)} = 24000000 \frac{рад}{с^6}$ , то граничные значения угла поворота исполнительного органа механизма  $\varphi_{зр.1} = 8рад$  и  $\varphi_{зр.2} = 288рад$ .

На рисунке 1 представлена 18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом, на которой электропривод отрабатывает угол поворота исполнительного органа механизма  $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 24рад$  за время  $T_u = 1,2с$ . Остальные параметры диаграммы:

$$t_1 = 0,029289321с; \quad t_2 = 0,0414211356с; \quad t_3 = 0,2с; \quad \omega_{max} = 40 \frac{рад}{с}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 1171,572875 \frac{рад}{с^3};$$

$$\omega_{max}^{(3)} = 20588,74503 \frac{рад}{с^4}; \quad \omega_{max}^{(4)} = 702943,7252 \frac{рад}{с^5}; \quad \omega_{max}^{(5)} = 24000000 \frac{рад}{с^6}.$$

### Выводы

Для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом разработана 18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма.

Для определения параметров 18-этапной оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом найдены аналитические зависимости.

Установлена область существования 18-этапной оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом.

18-этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом применима как для электроприводов постоянного, так и переменного тока.

### Литература:

1. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Чуб Н.В. Четырнадцать этапная оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом / Научные труды КубГТУ. – 2017. – № 2. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1400>

### References:

1. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Chub N.V. To fourteen the landmark chart, optimum on speed, for small movements of executive body of the precision electric drive of a direct current with the elastic shaft line / Scientific works of KubGTU. – 2017. – No. 2. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1400>